榆木蠹蛾雄蛾对性信息素不同组分及其不同比例和剂量混合物的风洞行为反应

杨美红[1], 刘红霞[1], 刘金龙[1], 范丽华[1], 荆小院[2], 张金桐[1,*], 宗世祥[3], 骆有庆[3]

(1. 山西农业大学化学生态研究所, 山西太谷 030801; 2. 山西农业大学生命科学学院, 山西太谷 030801; 3. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:【目的】本研究旨在深入了解榆木蠹蛾 *Holcocerus vicarius* (Walker)信息素通讯系统。【方法】在风洞中观察了榆木蠹蛾雄蛾对合成性信息素不同组分及其不同比例及剂量混合物的行为反应。【结果】单组分试验结果表明,仅有 *Z*7-14:Ac 能够引起少量雄蛾完成从兴奋到接触诱芯并出现预交尾的全部行为反应,其余 4 个单组分(*E*3-14:Ac, *Z*3*E*5-14:Ac, *E*3-14:OH 和 *Z*3-14:OH)只能引起雄蛾兴奋,均不能引起雄蛾向性信息素源定向飞行。二元混合物(*Z*7-14:Ac + *E*3-14:Ac)明显增加雄蛾完整的性行为反应比例,三元混合物(*Z*7-14:Ac + *E*3-14:Ac + *Z*3*E*5-14:Ac)比例为 10:4:4,剂量为 1 300 μg 时有 71.7% 雄蛾发生预交尾,剂量为 1 000 μg 时有 70.3% 雄蛾发生预交尾,两者差异不显著($P > 0.05$)。【结论】榆木蠹蛾风洞行为实验为进一步研究其性信息素相关生物学特性及应用性信息素对榆木蠹蛾进行综合防治奠定了基础。

关键词: 榆木蠹蛾; 性信息素; 风洞; 行为反应; 诱芯

中图分类号: Q968 **文献标识码:** A **文章编号:** 0454-6296(2015)01-0038-07

Behavioral responses of male adults of *Holcocerus vicarius* (Lepidoptera: Cossidae) to synthetic sex pheromone components and their mixtures in different ratios and at different dosages in wind tunnel

YANG Mei-Hong[1], LIU Hong-Xia[1], LIU Jin-Long[1], FAN Li-Hua[1], JING Xiao-Yuan[2], ZHANG Jin-Tong[1,*], ZONG Shi-Xiang[3], LUO You-Qing[3] (1. Institute of Chemical Ecology, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China; 2. College of Life Science, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China; 3. Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:【Aim】This study aims to deeply understand the sex pheromone communication system of *Holcocerus vicarius* (Walker).【Methods】The behavioral responses of male adults of *H vicarius* to synthetic sex pheromone components and their mixtures in different ratios and at different dosages were observed in wind tunne.【Results】The results of single component tests showed that the lures containing only (*Z*)-7-tetradecenyl acetate (*Z*7-14:Ac) elicited all steps of behavioral responses of male adults, *i. e.*, exciting, landing on the lure and exhibiting their hairpencils, while other four single components (*E*3-14:Ac, *Z*3*E*5-14:Ac, *E*3-14:OH and *Z*3-14:OH) elicited the male adults exciting only, but not flying to the sex pheromone source. The binary mixture of (*E*)-3-tetradecenyl acetate (*E*3-14:Ac) and *Z*7-14:Ac caused an increase in the intact sexual response proportion of males to synthetic sex pheromone components. When the lures were baited with the ternary mixture including *Z*7-14:Ac, *E*3-14:Ac and (*Z*,*E*)-3,5-tetradecenyl acetate (*Z*3*E*5-14:Ac) in a 10:4:4 ratio at the dosage of 1 300 μg or 1 000 μg, they elicited 71.7% or 70.3% of males to behave hairpencils, respectively, but no significant difference between them ($P > 0.05$).【Conclusion】Wind tunnel behavioral tests of *H. vicarius* provide the basis for studying the sex pheromone related biology of *H. vicarius* and developing comprehensive prevention and control strategies by applying sex pheromone.

Key words: *Holcocerus vicarius*; sex pheromone; wind tunnel; behavioral responses; lure

---

基金项目: 山西省科技攻关项目(20120311013-3); 国家自然科学基金项目(31070581); "十二五"国家科技支撑计划项目(2012BAD19B07)
作者简介: 杨美红, 女, 1970 年生, 山西太谷人, 博士, 教授, 主要从事化学生态学研究, E-mail: zxymh123@163.com
* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhangjintong@126.com
收稿日期 Received: 2014-06-20; 接受日期 Accepted: 2014-10-19

榆木蠹蛾 *Holcocerus vicarius*（Walker）是我国阔叶树的重要蛀干害虫，对“三北”地区防护林建设及城镇绿化威胁很大，主要为害白榆 *Ulmus pumila* L.、刺槐 *Robinia pseudoacacia* L.、麻栎 *Quercus acutissima* Carr.、金银花 *Lonicera japonica* Thunb.、花椒 *Zanthoxylum bungeanum* Maxim.、柳树 *Salix babylonica* L.、杨树 *Populus* spp.、核桃 *Juglans regia* L. 和苹果 *Malus pumila* Mill. 等（萧刚柔，1992），是2003 年国家林业局发布的“林业危险性有害生物名单”中的有害生物之一（国家林业局防止外来林业有害生物管理办公室，2003）。该虫生活隐蔽，主要以幼虫为害寄主枝干和根颈部，在林木中钻蛀大虫道，严重影响木材质量，常造成树木风折及死亡，严重时可造成成片树林毁灭。因此探讨榆木蠹蛾的有效防治已经迫在眉睫，用性信息素或性诱剂防治则使用简便、不伤害天敌、对环境友好。

通过毛细管气相色谱（GC）分析技术对榆木蠹蛾雌蛾性信息素进行提取分析，发现其性信息素分泌腺体中含反-3-十四碳烯醇（*E*3-14：OH）、顺-3-十四碳烯醇（*Z*3-14：OH）、反-3-十四碳烯醇乙酸酯（*E*3-14：Ac）、顺-7-十四碳烯醇乙酸酯（*Z*7-14：Ac）和顺-3-反-5-十四碳烯醇乙酸酯（*Z*3*E*5-14：Ac）5 种组分，其比例为 1∶0.9∶4∶10∶4，并通过触角电位（EAG）试验和林间诱蛾活性试验表明 *Z*7-14：Ac，*E*3-14：Ac 和 *Z*3*E*5-14：Ac 的比例为 10∶4∶4，剂量为900～1 440 μg 制成的性诱剂诱芯具有很好的诱蛾活性（杨美红等，2012）。为了更详尽地观察榆木蠹蛾雄蛾对雌蛾性信息素的行为反应过程，本研究利用风洞测定榆木蠹蛾雄蛾对性信息素单组分、二元混合物及其不同比例和不同剂量多元混合物的行为反应，旨在确定各个组分在雄蛾定向飞行中的作用，并确定具有引诱活性的信息素组分、比例和剂量，为利用性信息素诱杀榆木蠹蛾雄蛾及进行虫情监测提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　供试虫源

供试榆木蠹蛾老熟幼虫采自宁夏回族自治区盐池县机械化林场高沙窝分厂，带回室内饲养于装有潮湿细沙和寄主植物白榆树干的养虫笼（60 cm×45 cm×30 cm）中、待其化蛹，室内光周期 14L∶10D，温度 26±1℃，相对湿度 65%±8%。成虫羽化后将雌、雄蛾分别置于纱笼（60 cm×60 cm×60 cm），以10% 蜂蜜水饲喂。

1.2　性信息素提取

雌蛾腺体提取参照杨美红等（2010）的方法，取2 日龄的处女雌蛾 100 头进行提取，提取液用 N_2 气流小心浓缩至适当体积，溶液浓度为 1 FE/20 μL［FE＝雌当量（female equivalent）］，存入－20℃冰箱中待用。每个诱芯吸取 100 μL 浓缩液。

1.3　风洞装置

风洞以铝合金框架支撑，其余由有机玻璃制成，长 2.5 m，高和宽各 1 m，风洞的鼓气装置包括风扇和过滤器，采用 SW-CJ-1B 标准型净化工作台（苏州市生源净化设备有限公司生产）作为供风装置，风速控制为 0.3 m/s，温度为 26±1℃，相对湿度为60%±10%，红光光强为 0.3 lx，风洞下风口端装有排气管将带有性信息素化合物的气流排出室外。诱芯支架高 20 cm，位于距上口端 25 cm 处，雄蛾置于距下风端 25 cm 处的支架上。

1.4　诱芯的配制

性信息素组分由山西农业大学化学生态研究所合成，经 GC 检测纯度大于 99%，将雌蛾腺体粗提物100 μL 及溶解于重蒸正己烷的性信息素组分按所需不同比例和剂量滴加到特制反口橡胶塞（中国科学院动物研究所提供）的凹杯中，待溶剂挥发后，用聚乙烯保鲜膜密封，置于低温冰箱内保存备用。试验时将诱芯用昆虫针插在诱芯支架上，每个诱芯只使用 1 次。用活雌蛾作诱芯时，将活雌蛾置于纱笼（10 cm×10 cm×10 cm）中，试验时将装有活雌蛾的小纱笼放在诱芯支架上。配制诱芯的组分为 *Z*7-14：Ac，*E*3-14：Ac，*Z*3E5-14：Ac，*E*3-14：OH 和 *Z*3-14：OH 分别用 A，B，C，G 和 H 表示。

1.5　行为测试

将 2－3 日龄的未交尾榆木蠹蛾雄蛾分别装入纱笼（10 cm×10 cm×10 cm），于暗期 3－4 h（此时为雌蛾求偶高峰）后移入风洞条件下适应 0.5 h，并置于风洞的距下风口端25 cm、距底部约 15 cm 处的释放支架上，合成性信息素、雌蛾腺体粗提物及装在纱笼中的活雌蛾置于上风口端诱芯支架上，打开红光灯，观察记录其飞行行为，并根据其行为判断榆木蠹蛾对合成性信息素、活雌蛾、雌蛾腺体粗提物的反应等级。引入羽化 2－3 日龄单头雄蛾到下风口端支架上，任其反应 2 min，如无反应则换另一头雄蛾试验，如雄蛾起飞但反向飞出风洞或触及风洞任何一壁停留时间超过 5 s 均视为结束实验而换另一头雄蛾。每个处理重复 3 次，每次重复 20 头雄蛾。

判断雄蛾对刺激物反应的行为标准是:①兴奋:雄蛾触角竖起、摆动,振翅,前足不断地梳理触角,爬行;②起飞:沿性信息素气迹做锯齿形逆风飞行;③定向飞行:沿性信息素气迹定向飞行(逆风定向飞行距离大于等于风洞长度的 1/2);④到达性信息素源:在释放源或雌蛾附近(距离性信息素源小于等于 10 cm)降落;⑤搜索释放源或雌蛾;⑥预交尾:雄蛾展翅、追逐雌蛾,抬起腹部,抱握器伸出,振翅;⑦交尾:腹部末端自侧面前弯使抱握器对向诱芯(杜家纬, 1988; 刘玉秀和孟宪佐, 2002; 向玉勇等, 2009)。

1.6 数据处理

用 SPSS 13.0 统计软件对数据进行分析处理,采用单因素方差分析(ANOVA),Duncan 氏多重比较法检验差异显著性。

2 结果与分析

2.1 榆木蠹蛾雄蛾对单一合成化合物、处女雌蛾及腺体粗提物的行为反应

榆木蠹蛾活雌蛾及腺体粗提物引起雄蛾接近诱芯及企图交尾的百分率很高(表 1),处女雌蛾引起预交尾行为达到 74.1%,性腺体粗提物引起的预交尾行为比例达到 72.2%,两者活性差异不显著($P>0.05$),合成性信息素单一组分均能引起雄蛾兴奋和起飞,只有 A 组分 *Z*7-14:Ac 能引起雄蛾定向飞行和接近诱芯,并企图交尾的行为反应,但引起雄蛾接近诱芯及企图交尾的百分率很低,极显著低于雌蛾腺体粗提物和活雌蛾($P<0.01$),单一组分 B, C, G 和 H 之间引起雄蛾起飞的百分率之间差异不显著($P>0.05$),但显著低于单一组分 A 引起的雄蛾起飞百分率($P<0.05$)。

2.2 榆木蠹蛾雄蛾对合成性信息素二元混合物的行为反应

选取能激起雄蛾起飞的单一组分 B, C, G 和 H 和能引起榆木蠹蛾雄蛾预交尾的 A 组分分别组成二元组分进行风洞试验(表 2),AB 混合物诱芯显示了很强的引诱活性,有 24.3% 的雄蛾能到达诱芯附近,有 22.3% 的能进行搜索活动,并且 17.5% 的显示出预交尾行为,说明一定量的 B 组分能增强 A 组分的诱蛾活性。AC, AG 和 AH 组分也能引起雄蛾的一系列预交尾行为反应,但极显著低于 AB 组分引起的反应($P<0.01$)。而 BC, BG 和 BH 3 种混合物只引起一定量雄蛾的定向飞行,但都不能到达诱芯附近。CG, CH 和 GH 混合物只能引起雄蛾起飞,没有进行定向飞行。

表 1 榆木蠹蛾雄蛾对单一合成化合物、处女雌蛾及腺体粗提物在风洞中的行为反应

Table 1 Behavioral responses of male adults of *Holcocerus vicarius* to single component of synthetic sex pheromone, virgin female and sex gland extract in wind tunnel

组分 Components	行为反应 Behavioral responses (%)					
	兴奋 AT	起飞 TF	定向飞行 UF	到达释放源 TD	搜索释放源 WW	预交尾 CB
A	100	68.3 ±5.8 Bb	20.5 ±2.1 Bb	16.3 ±1.1 Bb	12.3 ±2.0 Bb	6.5 ±0.3 Bb
B	100	51.6 ±5.2 Bc	–	–	–	–
C	100	48.9 ±5.0 Bc	–	–	–	–
G	100	50.4 ±5.7 Bc	–	–	–	–
H	100	46.3 ±0.0 Bc	–	–	–	–
处女雌蛾(1 头) Virgin female (1 individual)	100	100 Aa	87.3 ±5.3 Aa	85.4 ±7.1 Aa	83.0 ±8.7 Aa	74.1 ±6.8 Aa
性信息素粗提物(5FE) Extracts of sex pheromone	100	100 Aa	85.6 ±8.8 Aa	83.1 ±6.8 Aa	81.5 ±4.9 Aa	72.2 ±7.3 Aa

A: 顺-7-十四碳烯醇乙酸酯 *Z*7-14:Ac; B: 反-3-十四碳烯醇乙酸酯 *E*3-14:Ac; C: 顺-3-反-5-十四碳烯醇乙酸酯 *Z*3*E*5-14:Ac; G: 反-3-十四碳烯醇 *E*3-14:OH; H: 顺-3-十四碳烯醇 *Z*3-14:OH. FE: 雌当量 Female equivalents. –: 无反应 No response; AT: 兴奋(激活阶段在释放管或笼内爬行, 振翅)Exciting (walking and wing fanning during the activation phase in the release tube or cage); TF: 起飞 Taking flight; UF: 定向飞行 Oriented upwind flight and arrival in the middle of the tunnel; TD: 到达释放源 Touch down at source; WW: 搜索释放源 Walking and wing fanning at source; CB: 预交尾 Copulatory behavior. 表中数据为平均值 ± 标准差,经 Duncan 氏多重比较法检验同列数据,不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)。Data in the table are mean ± *SD*, and those in the column with different small letters are significantly different ($P<0.05$), while those with different capital letters are extremely significantly different ($P<0.01$) by Duncan's multiple range test. 下表同 The same for the following tables. 单个诱芯单组分剂量为 0.5 mg。The dosage of single component in each lure is 0.5 mg.

表 2　榆木蠹蛾雄蛾对合成性信息素二元混合物的风洞行为反应

Table 2　Behavioral responses of male adults of *Holcocerus vicarius* to binary component mixtures of synthetic sex pheromone in wind tunnel

混合物 Mixtures	行为反应 Behavioral responses (%)					
	兴奋 AT	起飞 TF	定向飞行 UF	到达释放源 TD	搜索释放源 WW	预交尾 CB
AB	100	82.4 ±5.9 Aa	30.5 ±4.3 Aa	24.3 ±3.7 Aa	22.3 ±3.2 Aa	17.5 ±2.1 Aa
AC	100	73.7 ±4.3 Bb	27.6 ±2.1 Aa	12.7 ±2.9 Bb	8.6 ±1.3 Bb	4.4 ±0.7 Bc
AG	100	64.9 ±2.4 Bc	19.6 ±1.4 Ab	11.0 ±2.4 Bb	9.4 ±1.0 Bb	7.1 ±0.9 Bb
AH	100	65.7 ±3.8 Bc	21.5 ±3.3 Ab	14.2 ±3.3 Bb	7.2 ±1.0 Bb	6.8 ±1.3 Bb
BC	100	50.1 ±3.1 Cd	18.9 ±1.5 Ab	–	–	–
BG	100	54.4 ±3.2 Cd	12.4 ±1.1 Bc	–	–	–
BH	100	52.0 ±2.5 Cd	10.3 ±1.6 Bc	–	–	–
CG	100	50.7 ±4.6 Cd	–	–	–	–
CH	100	47.9 ±3.6 Cd	–	–	–	–
GH	100	46.8 ±5.0 Cd	–	–	–	–

单个诱芯总剂量为 1.0 mg,各组分分别为 0.5 mg。The dosage of each lure is 1.0 mg and each component is 0.5 mg.

2.3　榆木蠹蛾雄蛾对合成性信息素三元混合物的行为反应

榆木蠹蛾雄蛾对合成性信息素三元混合物反应(表3),ABC 混合物诱芯显示了强烈的引诱活性,能引诱 82.4% 的雄蛾到达诱芯附近,有 72.3% 的个体能进行搜索活动,并且 68.7% 的个体显示出预交尾行为。ABG 和 ABH 两种混合物也能引起雄蛾出现预交尾行为,但活性显著小于 ABC 混合物($P < 0.05$)。BCH 混合物只能引诱 25.3% 雄蛾到达诱芯附近,但没有出现搜索行为。BCG,BGH 和 CGH 混合物均不能引诱雄蛾到达诱芯附近。

2.4　榆木蠹蛾雄蛾对合成性信息素四元混合物及全组分的行为反应

榆木蠹蛾雄蛾对合成性信息素四元混合物及全组分反应(表 4),全组分 ABCGH 显示出最强的引诱活性,72.7% 的雄蛾出现预交尾行为,极显著高于四元组分 ABGH 引起的预交尾反应百分率($P < 0.01$),但和四元混合物 ABCG 及 ABCH 引起的预交尾反应百分率差异不显著($P > 0.05$)。BCGH 组分没有引起雄蛾的搜索行为,仅能到达释放源。

表 3　榆木蠹蛾雄蛾对合成性信息素三元混合物的风洞行为反应

Table 3　Behavioral responses of male adults of *Holcocerus vicarius* to ternary component mixtures of synthetic sex pheromone in wind tunnel

混合物 Mixtures	行为反应 Behavioral responses (%)					
	兴奋 AT	起飞 TF	定向飞行 UF	到达释放源 TD	搜索释放源 WW	预交尾 CB
ABC	100	100 Aa	85.9 ±10.5 Aa	82.4 ±8.5 Aa	72.3 ±7.4 Aa	68.7 ±6.6 Aa
ABG	100	100 Aa	74.3 ±4.9 Bb	63.4 ±3.0 Ab	59.1 ±5.7 Ab	51.2 ±3.9 Ab
ABH	100	100 Aa	72.5 ±6.7 Bb	65.3 ±4.9 Ab	63.0 ±6.0 Ab	57.6 ±6.0 Ab
BCH	100	68.4 ±8.5 Bb	41.6 ±5.5 Cd	25.3 ±3.9 Bc	–	–
BCG	100	59.9 ±4.0 Bc	50.0 ±8.0 Cc	–	–	–
BGH	100	61.3 ±5.3 Bc	38.8 ±2.6 Cd	–	–	–
CGH	100	57.8 ±4.2 Bc	42.7 ±5.1Cd	–	–	–

单个诱芯总剂量为 1.5 mg,各组分分别为 0.5 mg。The dosage of each lure is 1.5 mg and each component is 0.5 mg.

表 4　榆木蠹蛾雄蛾对合成性信息素四元混合物及全组分的风洞行为反应

Table 4　Behavioral responses of male adults of *Holcocerus vicarius* to quaternary component mixtures and full components of synthetic sex pheromone in wind tunnel

组分 Components	行为反应 Behavioral responses (%)					
	兴奋 AT	起飞 TF	定向飞行 UF	到达释放源 TD	搜索释放源 WW	预交尾 CB
ABCG	100	100 Aa	86.4 ±9.3 Aa	83.7 ±11.5 Aa	74.0 ±6.3 Aa	71.5 ±7.9 Aa
ABCH	100	100 Aa	84.8 ±7.7 Aa	83.4 ±10.3 Aa	74.2 ±8.0 Aa	70.1 ±6.8 Aa
ABGH	100	100 Aa	74.9 ±4.3 Bb	65.3 ±5.3 Bb	63.0 ±3.9 Bb	54.3 ±7.0 Bb
BCGH	100	68.1 ±4.7 Bb	48.6 ±7.2 Cc	22.1 ±4.0 Cc	–	–
ABCGH	100	100 Aa	88.5 ±10.3 Aa	83.8 ±8.8 Aa	75.2 ±5.9 Aa	72.7 ±7.0 Aa

各组分分别 0.5 mg,即四元混合物总剂量为 2.0 mg,全组分总剂量为 2.5 mg。Each component is 0.5 mg. The dosage of the quatemary components in each lure is 2.0 mg and that of the full components in each lure is 2.5 mg.

2.5 榆木蠹蛾雄蛾对不同比例合成性信息素三元混合物 ABC 的行为反应

将诱蛾效果理想的合成性信息素三元混合物 ABC(*Z*7-14:Ac + *E*3-14:Ac + *Z*3*E*5-14:Ac)按不同比例组合进行风洞试验(表 5),比例为 1:2:10 和 1:4:10 分别仅能引起 3.6% 和 1.1% 雄蛾产生预交尾行为,1:6:10 和 1:8:10 仅能引起部分雄蛾起飞,不产生定向飞行等行为,说明 *Z*7-14:Ac 量小于 66.7 μg时,*Z*7-14:Ac + *E*3-14:Ac + *Z*3*E*5-14:Ac 三元混合物诱芯没有引诱活性。增大 *Z*7-14:Ac 比例时,Tr5 ~ Tr12 中 100% 雄蛾个体显示预交尾行为,Tr5 ~ Tr8 单诱芯总剂量一定,*Z*7-14:Ac 比例恒定,随着 *E*3-14:Ac 比例提高,三元混合物对雄蛾引诱活性略有提高,但 Tr5,Tr6,Tr7 和 Tr8 之间差异不显著($P > 0.05$)。选取和腺体粗提物的 GC 分析结果一致的 Z7-14:Ac 和 *E*3-14:Ac 比例 10:4(杨美红等, 2012),改变 *Z*3*E*5-14:Ac 比例,3 种合成性信息素 ABC 比例为 10:4:4 时有 70.3% 雄蛾产生预交尾行为,引起雄蛾行为反应的百分率最高,接近雌蛾腺体粗提物和活雌蛾的活性。因此选择 *Z*7-14:Ac:*E*3-14:Ac:*Z*3*E*5-14:Ac = 10:4:4 作为最佳比例,该比例和 GC 分析各组分比例相吻合(杨美红等, 2012)。

2.6 榆木蠹蛾雄蛾对不同剂量性信息素三元混合物 ABC 的行为反应

根据最佳组分比例合成性信息素三元混合物 ABC(*Z*7-14:Ac:*E*3-14:Ac:*Z*3*E*5-14:Ac)为 10:4:4 进行不同剂量风洞试验(表 6),比例相同的诱芯中性信息素的含量增加,出现预交尾比例增大。单诱芯性信息素含量达到 1 000 μg 和 1 300 μg 时预交尾百分率均极显著高于其他剂量($P < 0.01$),剂量为 1 300 μg 的引诱活性高于 1 000 μg,但它们之间差异不显著($P > 0.05$)。

表 5 榆木蠹蛾雄蛾对不同比例合成性信息素三元混合物 *Z*7-14:Ac + *E*3-14:Ac + *Z*3*E*5-14:Ac 的风洞行为反应

Table 5 Behavioral responses of male adults of *Holcocerus vicarius* to the mixture of ternary components *Z*7-14:Ac + *E*3-14:Ac + *Z*3*E*5 -14:Ac of synthetic sex pheromone in different ratios in wind tunnel

处理 Treatment	组分比例(*Z*7-14:Ac:*E*3-14:Ac:*Z*3*E*5-14:Ac) Ratios of components	行为反应 Behavioral responses (%)					
		兴奋 AT	起飞 TF	定向飞行 UF	到达释放源 TD	搜索释放源 WW	预交尾 CB
Tr1	1:2:10	100	54.5 ±4.2 Bb	18.2 ±2.0 Cd	12.3 ±2.4 Cc	6.6 ±4.7 Cc	3.6 ±0.7 Ce
Tr2	1:4:10	100	45.3 ±3.3 Bb	4.2 ±0.4 De	3.1 ±0.7 Dd	1.8 ±0.4 Dd	1.1 ±0.6 Df
Tr3	1:6:10	100	36.0 ±3.2 Bc	–	–	–	–
Tr4	1:8:10	100	27.4 ±2.4 Cd	–	–	–	–
Tr5	10:2:1	100	100 Aa	62.7 ±6.4 Bc	58.3 ±5.0 Bb	50.4 ±4.4 Bb	44.8 ±5.4 Bd
Tr6	10:4:1	100	100 Aa	65.4 ±7.3 Bc	60.3 ±7.1 Bb	55.1 ±7.7 Bb	46.6 ±4.4 Bd
Tr7	10:6:1	100	100 Aa	72.1 ±8.0 Bb	59.2 ±4.4 Bb	52.3 ±6.1 Bb	47.3 ±5.1 Bd
Tr8	10:8:1	100	100 Aa	75.2 ±7.7 Bb	60.9 ±5.7 Bb	55.6 ±5.6 Bb	47.7 ±4.3 Bd
Tr9	10:4:2	100	100 Aa	80.0 ±8.7 Aa	74.5 ±7.7 Aa	67.3 ±5.3 Aa	59.3 ±5.9 Ab
Tr10	10:4:4	100	100 Aa	80.3 ±8.9 Aa	78.3 ±6.9 Aa	72.7 ±7.2 Aa	70.3 ±6.8 Aa
Tr11	10:4:6	100	100 Aa	74.4 ±7.2 Bb	72.1 ±7.4 Aa	68.4 ±6.0 Aa	62.1 ±5.5 Ab
Tr12	10:4:8	100	100 Aa	69.2 ±9.4 Bb	62.3 ±7.3 Bb	58.4 ±4.7 Bb	51.4 ±4.7 Bc

单个诱芯总剂量为 1.0 mg。The dosage of each lure is 1.0 mg.

表 6 榆木蠹蛾雄蛾对不同剂量合成性信息素三元混合物 *Z*7-14:Ac + *E*3-14:Ac + *Z*3*E*5-14:Ac 风洞行为反应

Table 6 Behavioral responses of male adults of *Holcocerus vicarius* to the mixture of ternary components *Z*7-14:Ac + *E*3-14:Ac + *Z*3*E*5-14:Ac of synthetic sex pheromone at different dosages in wind tunnel

组分剂量(μg) Dosage of components	行为反应 Behavioral responses (%)					
	兴奋 AT	起飞 TF	定向飞行 UF	到达释放源 TD	搜索释放源 WW	预交尾 CB
200	100	53.1 ±4.2 Dd	17.6 ±2.0 De	11.8 ±1.4 Cf	6.9 ±1.4 Df	5.6 ±0.3 Ce
400	100	57.7 ±5.5 Dd	21.4 ±2.4 De	19.5 ±2.2 Ce	14.2 ±0.8 Ce	11.1 ±0.6 Cd
600	100	68.2 ±6.2 Cc	33.1 ±3.3 Cd	24.9 ±3.5 Cd	20.8 ±2.6 Cd	17.9 ±1.2 Cc
800	100	82.0 ±9.6 Bb	55.2 ±5.4 Bc	47.0 ±5.1 Bc	40.1 ±3.7 Bc	32.9 ±4.5 Bb
1 000	100	100 Aa	80.3 ±7.6 Ab	78.3 ±9.6 Ab	72.7 ±7.4 Ab	70.3 ±9.0 Aa
1 300	100	100 Aa	91.3 ±9.3 Aa	87.3 ±8.4 Aa	82.8 ±9.0 Aa	71.7 ±6.9 Aa

3 讨论

通过对榆木蠹蛾性信息素组分的风洞行为试验表明,5 种单一组分中只有 A 组分(*Z*7-14:Ac)能引起雄蛾向性信息素源的完整的行为反应,而雌蛾腺体内其他组分单独使用时均不能引起雄蛾完整的性行为反应,可见 *Z*7-14:Ac 是性信息素的主级成分,起长距离趋化作用,同时也具有激起雄蛾降落、企图交尾的作用。Quero 等(1996)对海灰翅夜蛾 *Spodoptera littoralis*(Boisduval)以及孙凡等(2003)对斜纹夜蛾 *Spodoptera litura*(Fabricius)进行风洞行为生测结果也表现为雄蛾对其性信息素的主级成分有完整的行为反应。二元混合物中 AB, AC, AG 和 AH 均能引起雄蛾的预交尾反应,以 AB 组对雄蛾的引诱活性最强,有 17.5% 的雄蛾产生预交尾行为;三元混合物 ABC(*Z*7-14:Ac, *E*3-14:Ac, *Z*3*E*5-14:Ac)以及四元混合物 ABCG(*Z*7-14:Ac, *E*3-14:Ac, *Z*3*E*5-14:Ac, *E*3-14:OH)和 ABCH(*Z*7-14:Ac, *E*3-14:Ac, *Z*3*E*5-14:Ac, *Z*3-14:OH)引诱活性逐渐增强;全组分性信息素诱蛾活性达 72.7%,显著高于单组分、二元、三元及四元组分。Linn 等(1986)对红带卷叶蛾 *Argyrotaenia velutinana*(Walker), Quartey 和 Coaker(1993)对烟草粉螟 *Ephestia cautella*(Walker),韩桂彪等(2001)对枣镰翅小卷蛾 *Ancylis sativa* Liu 进行风洞生测时也发现雄蛾对全组分性信息素的行为反应百分率明显大于其部分组分混合物或单个组分,说明在蛾类性信息素系统中,性信息素的完整性起着非常重要的作用。而向玉勇等(2009)认为全组分性信息素对小地老虎 *Agrotis ypsilon*(Rottemberg)雄蛾的预交尾行为有抑制作用,这可能与不同种类昆虫的生物学及不同地理环境有关。

性信息素组分比例对榆木蠹蛾雄蛾的行为反应有明显的影响,*Z*7-14:Ac,*E*3-14:Ac 和 *Z*3*E*5-14:Ac 含量之比为 10∶4∶4,即与利用毛细管气相色谱分析处女雌蛾性腺体提取物各组分比例一致时,引起的雄蛾行为反应百分率最高,这与其他一些昆虫的试验结果类似,如枣镰翅小卷蛾雄蛾对 6.5∶3.5 的 *E*9-12:Ac 和 *Z*9-12:Ac 混合物(韩桂彪等, 2001)、黄斑卷蛾 *Acleris fimbriana*(Thunberg *et* Becklin)对 6∶4∶1的 *E*11, 13-14:Ald, *E*11, 13-14:Ac 和 *E*11-14:Ac 混合物(刘玉秀和孟宪佐, 2002)及小地老虎对3∶1∶1的 *Z*7-12:Ac, *Z*9-14:Ac 和 *Z*11-16:Ac 混合物(向玉勇等, 2009)的行为反应百分率高于其他比例。这可能是最接近于雌蛾释放的天然组分比例的性信息素混合物,具有对雄蛾最强的引诱力,只有精确的组分比例才能阻碍不同种间的交配,保证近缘昆虫的种间生殖隔离。

从剂量反应看,榆木蠹蛾雄蛾对合成性信息素三元混合物 *Z*7-14:Ac + *E*3-14:Ac + *Z*3*E*5-14:Ac 从 200 ~ 13 00 μg 均有反应,随诱芯中性信息素含量增加,出现预交尾比例增大。最佳风洞行为反应值为 1 000 μg 和 1 300 μg,这与作者的田间试验每诱芯含量为 900 ~ 1 440 μg 的诱蛾效果最强结果类似(杨美红等, 2012)。1 300 μg 合成性信息素引起雄蛾预交尾的比例(71.7%)小于 1 头处女雌蛾(74.1%)和 5 头处女雌蛾腺体粗提物(72.2%),是否为榆木蠹蛾腺体中还有次要性信息素成分未被鉴定有待进一步证实。

本研究结果表明,5 个雌蛾当量的性信息素粗提物比 1 头活雌蛾的引诱活性低,刘玉秀和孟宪佐(2002)对黄斑卷蛾,孙凡等(2003)对斜纹夜蛾以及向玉勇等(2009)对小地老虎的研究也有类似现象。其可能原因有:(1)由于有机溶剂正己烷提取雌蛾腺体时将体内存在的其他物质,如对雄蛾定向搜索雌蛾有抑制作用的化合物也进行了提取;(2)可能处女雌蛾在召唤状态时释放性信息素的量最大,但腺体提取时性信息素不一定达到雌蛾召唤的释放量;(3)可能因为活体雌蛾释放性信息素是一个精确控制的过程,而雌蛾腺体粗提物在载体上的释放仅仅是一个物理现象,其释放的性信息素比例与雌蛾腺体内组分的天然比例虽然比较接近,但二者不完全吻合,造成雌蛾腺体粗提物诱芯在风洞中引起雄蛾行为反应的百分率低于活雌蛾。

由实验结果可知, Z7-14: Ac, E3-14: Ac 和 *Z*3*E*5-14:Ac 这 3 种组分是榆木蠹蛾性信息素的主要活性成分,增加 *E*3-14:OH 及 *Z*3-14:OH 对榆木蠹蛾雄蛾的风洞行为反应无显著影响,腺体粗提物中发现 *E*3-14:OH 和 *Z*3-14:OH 可能是在榆木蠹蛾体内合成性信息素主要成分之一的 *E*3-14:Ac 的前体化合物,还有待于进一步研究。

参考文献(References)

Du JW, 1988. Insect Sex Pheromone and Its Application. China Forestry Press, Beijing. 120. [杜家纬, 1988. 昆虫信息素及其应用. 北京: 中国林业出版社. 120]

Linn CE, Campbell MG, Roelofs WL, 1986. Male moth sensitivity to multicomponent pheromones: critical role of female-released blend in

determining the functional role of components and active space of the pheromone. *Journal of Chemical Ecology*, 12(3): 659 –668.

Liu YX, Meng XZ, 2002. Behavioral response of male *Acleris fimbriana* Thunberg *et* Becklin (Lepidoptera: Tortricidae) to synthetic sex pheromones. *Acta Entomologica Sinica*, 45(4): 436 –440. [刘玉秀, 孟宪佐, 2002. 黄斑卷蛾雄蛾对性信息素的行为反应. 昆虫学报, 45(4): 436 –440]

Managing Office of Preventing Exotic Forest Pests of the National Forestry Bureau, 2003. List of Hazardous Forestry Pests. http://www.forestry.gov.cn, 2003-4-15. [国家林业局防止外来林业有害生物管理办公室, 2003. 林业危险性有害生物名单. http://www.forestry.gov.cn, 2003-4-15]

Quartey GK, Coaker TH, 1993. Role of sex pheromone components in the orientation behaviour of *Ephestia cautella*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 66(3): 237 –245.

Quero C, Lucas P, Renou M, Guerrero A, 1996. Behavioral responses of *Spodoptera littoralis* males to sex pheromone components and virgin females in wind tunnel. *Journal of Chemical Ecology*, 22(6): 1087 –1102.

Sun F, Du JW, Chen TH, 2003. The behavioral responses of *Spodoptera litura* (F.) males to the female sex pheromone in wind tunnel and field trapping tests. *Acta Entomologica Sinica*, 46(1): 126 –130. [孙凡, 杜家纬, 陈庭华, 2003. 斜纹夜蛾在风洞中对性信息素的行为反应及田间诱捕试验. 昆虫学报, 46(1): 126 –130]

Xiang YY, Yang MF, Shi ZH, Li ZZ, 2009. The behavioral response of the male black cutworm moth to female sex pheromone. *Acta Phytophylacica Sinica*, 36(3): 207 –212. [向玉勇, 杨茂发, 施祖华, 李子忠, 2009. 小地老虎雄蛾对性信息素的行为反应. 植物保护学报, 36(3): 207 –212]

Xiao GR, 1992. Forest Insects of China. China Forestry Press, Beijing. 765. [萧刚柔, 1992. 中国森林昆虫. 北京: 中国林业出版社. 765]

Yang MH, Zhang JT, Liu JL, Jing XY, Luo YQ, Zong SX, Cao CJ, Li YH, 2010. Reproductive behavior and circadian rhythm of sex pheromone production and release of *Holcocerus vicarius* (Walker) (Lepidoptera: Cossidae). *Acta Entomologica Sinica*, 53(11): 1273 –1280. [杨美红, 张金桐, 刘金龙, 荆小院, 骆有庆, 宗世祥, 曹川健, 李月华, 2010. 榆木蠹蛾生殖行为及性信息素产生与释放节律. 昆虫学报, 53(11): 1273 –1280]

Yang MH, Zhang JT, Zong SX, Luo YQ, Cao CJ, Fan LH, Liu HX, Xin HP, 2012. Synthesis and field evaluation of sex attractant for *Holcocerus vicarius* Walker (Lepidoptera: Cossidae). *Scientia Silvae Sinicae*, 48(4): 61 –66. [杨美红, 张金桐, 宗世祥, 骆有庆, 曹川健, 范丽华, 刘红霞, 辛海萍, 2012. 榆木蠹蛾性诱剂的合成及林间诱蛾试验. 林业科学, 48(4): 61 –66]

(责任编辑: 袁德成)